

Ю. Н. ЖУРАВЛЕВ, Д. С. ФЕДОРОВ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЯГОВОГО УСИЛИЯ НИЗКОЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО ВИБРОВОЗБУДИТЕЛЯ

Получено соотношение для оценки тягового усилия низкочастотного электродинамического вибровозбудителя, служащего для поверки и градуировки датчиков ускорения. Приведены результаты экспериментальных исследований.

Ключевые слова: вибровозбудитель, датчик ускорения, акселерометр, магнитный подвес, взаимная индуктивность.

Во многих областях современной техники (сейсмология, космическая и авиационная индустрия, мощные энергетические установки, строительство высотных объектов, транспорт) широко используются датчики ускорения (акселерометры), работающие в диапазоне малых частот (0,01...5 Гц). Для поверки и градуировки таких датчиков требуются вибровозбудители, способные обеспечивать одномерные горизонтальные гармонические колебания поверяемого акселерометра. Малые частоты колебаний вызывают необходимость создания больших амплитуд перемещений для обеспечения приемлемых значений ускорений. Эта необходимость исключает возможность использования традиционного вибровозбудителя электромагнитного типа [1]. В связи с этим был выбран электродинамический тип вибровозбудителя с активным магнитным подвесом подвижной части [2].

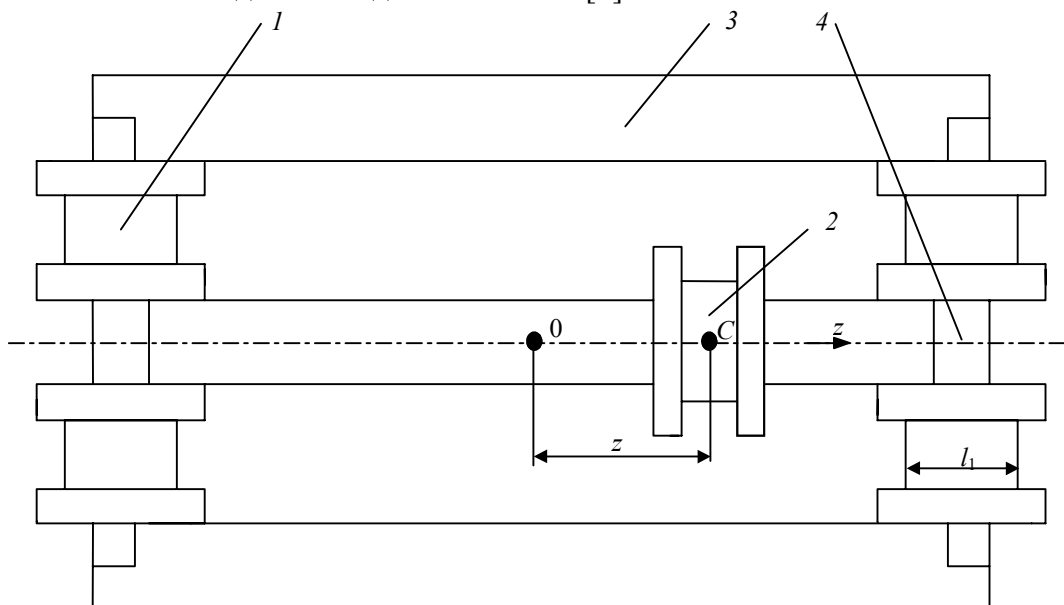


Рис. 1

Приводная часть вибровозбудителя (рис. 1) состоит из магнитопровода, четырех неподвижных катушек намагничивания 1 и одной подвижной катушки 2. Магнитопровод состоит из пяти горизонтально расположенных ферромагнитных стержней круглого поперечного сечения — трех продольных 3 и двух поперечных 4, соединяющих торцевые поверхности продольных стержней. Катушки намагничивания установлены на поперечные стержни, соединены последовательно, питаются постоянным током I_1 и создают постоянное магнитное поле по всей длине рабочего воздушного зазора между центральным и боковыми продольными стержнями. Подвижная катушка свободно установлена на центральный продольный

стержень. При питании катушки синусоидальным током на нее действует в продольном направлении гармоническая сила электродинамического воздействия. Подвижная катушка вместе с прикрепленным к ней акселерометром образует подвижную часть вибровозбудителя, которая снабжена системой подвеса. Из двух возможных типов подвеса без трения — воздушного и магнитного — был выбран активный магнитный подвес [3].

Одним из основных параметров вибровозбудителя является его тяговое усилие. Цель настоящей статьи — получение выражения для тягового усилия вибровозбудителя данной конструкции и сравнительный анализ расчетных значений тягового усилия с экспериментально полученными данными.

Пусть z — координата центра подвижной катушки, отсчитываемая от середины длины магнитопровода. Записав выражение для магнитной энергии системы и взяв частную производную от нее по координате z , получим выражение для электромагнитной силы тяги:

$$P_{\text{эм}} = \frac{\partial L_{12}}{\partial z} I_1 i_2(t), \quad (1)$$

где I_1 — ток катушек подмагничивания (первого контура); i_2 — ток подвижной катушки (второго контура); L_{12} — коэффициент взаимной индуктивности контуров катушек намагничивания.

Взаимную индуктивность контуров можно определить как $L_{12} = L_{21} = \Psi_{21}/I_1$, где Ψ_{21} — потокосцепление катушек первого контура с витками w_2 второго контура.

Предполагается, что магнитная система ненасыщенная и линейная, следовательно, магнитное сопротивление стали постоянно. Поэтому воспользовавшись принципом суперпозиции, декомпозируем магнитную систему на две подсистемы, одна из которых запитывается левыми катушками намагничивания, другая — правыми (рис. 2, а, б соответственно).

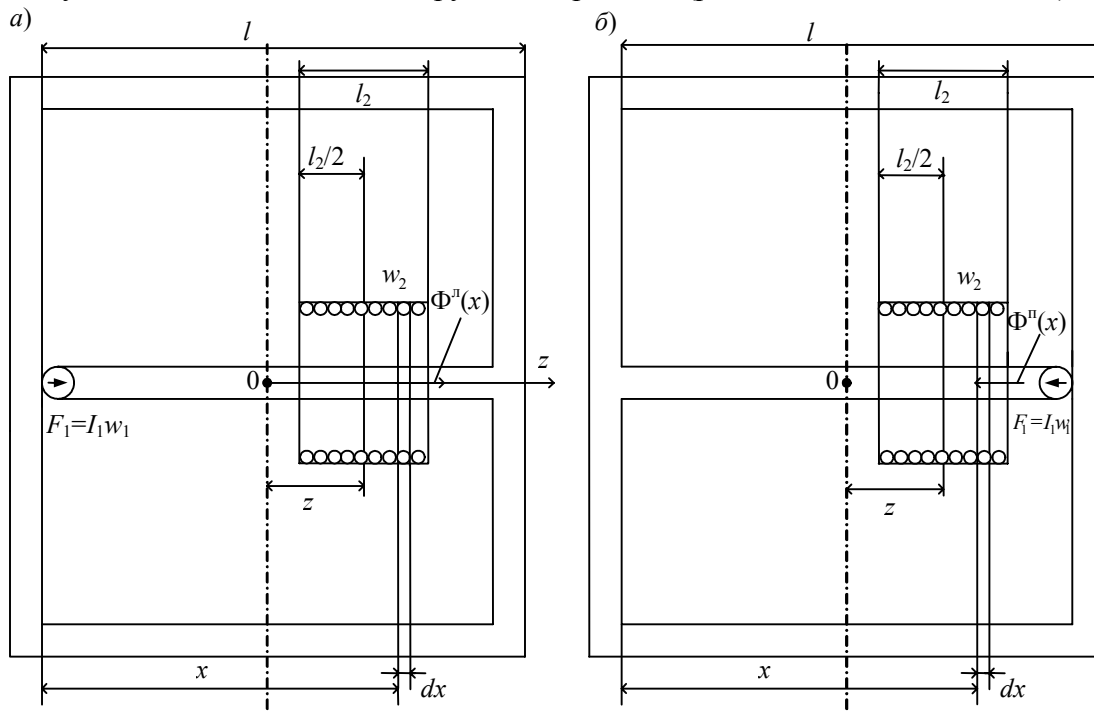


Рис. 2

Магнитодвижущую силу $F_1 w_1$, создаваемую двумя катушками намагничивания, расположенными на поперечном стержне, заменим магнитодвижущей силой, создаваемой одной катушкой, расположенной в начале продольного стержня. Тогда

$$\Psi_{21} = \Psi_{21}^{\text{л}} + \Psi_{21}^{\text{п}}, \quad (2)$$

где $\Psi_{21}^{\text{л}}$ и $\Psi_{21}^{\text{п}}$ — потокосцепления левой и правой катушек первого контура с витками второго контура.

В подвижной катушке выделим элемент длиной dx на расстоянии x от левого конца продольных стержней магнитопровода. Элемент имеет число витков $dw = \frac{w_2}{l_2} dx$, где l_2 — длина обмотки подвижной катушки. При этом очевидно, что составляющая магнитной индукции (B) в направлении оси z в воздухе равна нулю, а присутствует только радиальная составляющая. Кроме того, пусть диаметр l_1 катушек намагничивания мал по сравнению с длиной магнитопровода l .

Полагая, что левые и правые катушки намагничивания создают встречно направленные магнитные потоки, имеем

$$\Psi_{21}(z) = \Psi_{21}^{\text{л}}(z) + \Psi_{21}^{\text{п}}(z) = \frac{w_2}{l_2} \int_{z-l_2/2}^{z+l_2/2} (\Phi^{\text{п}}(x) - \Phi^{\text{л}}(x)) dx. \quad (3)$$

Здесь принято, что направление магнитодвижущей силы подвижной катушки в рассматриваемый момент времени совпадает с направлением магнитного потока правой катушки $\Phi^{\text{п}}(x)$.

Определим магнитные потоки, создаваемые левой и правой катушками. Рассматриваемая магнитная система представляет собой магнитную цепь, состоящую из распределенных по длине l продольных и поперечных магнитных сопротивлений. При этом продольными магнитными сопротивлениями являются магнитные сопротивления ферромагнитных стержней, а поперечными — магнитные сопротивления воздушного зазора между центральным и боковыми стержнями. Данную магнитную цепь можно считать однородной, так как все продольные сопротивления участков стержней одинаковой длины равны друг другу и поперечные сопротивления участков цепи одинаковой длины в силу параллельности стержней также равны друг другу. Магнитными сопротивлениями торцевых стержней пренебрежем. Расчетная схема магнитной цепи, соответствующей системе, представленной на рис. 2, а, приведена на рис. 3, а. Через dx обозначен бесконечно малый элемент длины магнитной цепи, через dR — магнитные сопротивления элементов стержней, через dG — магнитные проводимости воздушного зазора между этими элементами, через φ — магнитный потенциал.

Учитывая, что $\varphi_2 = F_1 - \Phi dR$, $\varphi_3 = \varphi_1 = \frac{\Phi}{2} dR$, имеем $\varphi_2 - \varphi_1 = \varphi_2 - \varphi_3 = F_1 - \Phi \frac{3}{2} dR = u_{21} = u_{23}$, где u_{ij} — магнитное напряжение между точками i и j . Кроме того, $2d\Phi = u_{21}dG + u_{23}dG = 2u_{21}dG$. Исходя из этого, трехпроводную систему на первом участке можно заменить двухпроводной. Аналогичным образом от расчетной схемы, представленной на рис. 3, а, можно перейти к схеме, приведенной на рис. 3, б. Для этой упрощенной схемы

$\rho = \frac{3R}{2l} = \frac{R^{\text{пр}}}{l}$ — приведенное продольное магнитное сопротивление единицы длины магнитопровода; R — магнитное сопротивление одного стержня; $R^{\text{пр}}$ — приведенное продольное магнитное сопротивление магнитопровода; $g = 2\frac{G}{l} = \frac{G^{\text{пр}}}{l}$ — приведенная поперечная магнитная проводимость единицы длины цепи; G — магнитная проводимость зазора между двумя стержнями; $G^{\text{пр}}$ — приведенная полная поперечная магнитная проводимость трех стержней.

Магнитное сопротивление стержня

$$R = \frac{u}{\Phi} = \frac{Hl}{BS} = \frac{l}{\mu S},$$

где S — площадь сечения стержня; $\mu = \mu_r \mu_0$ — осредненная магнитная проницаемость материала. С учетом этого имеем

$$\rho = \frac{3}{2l} R = \frac{3}{2\mu S}; \quad R^{\text{пп}} = \frac{3}{2} \frac{l}{\mu S}.$$

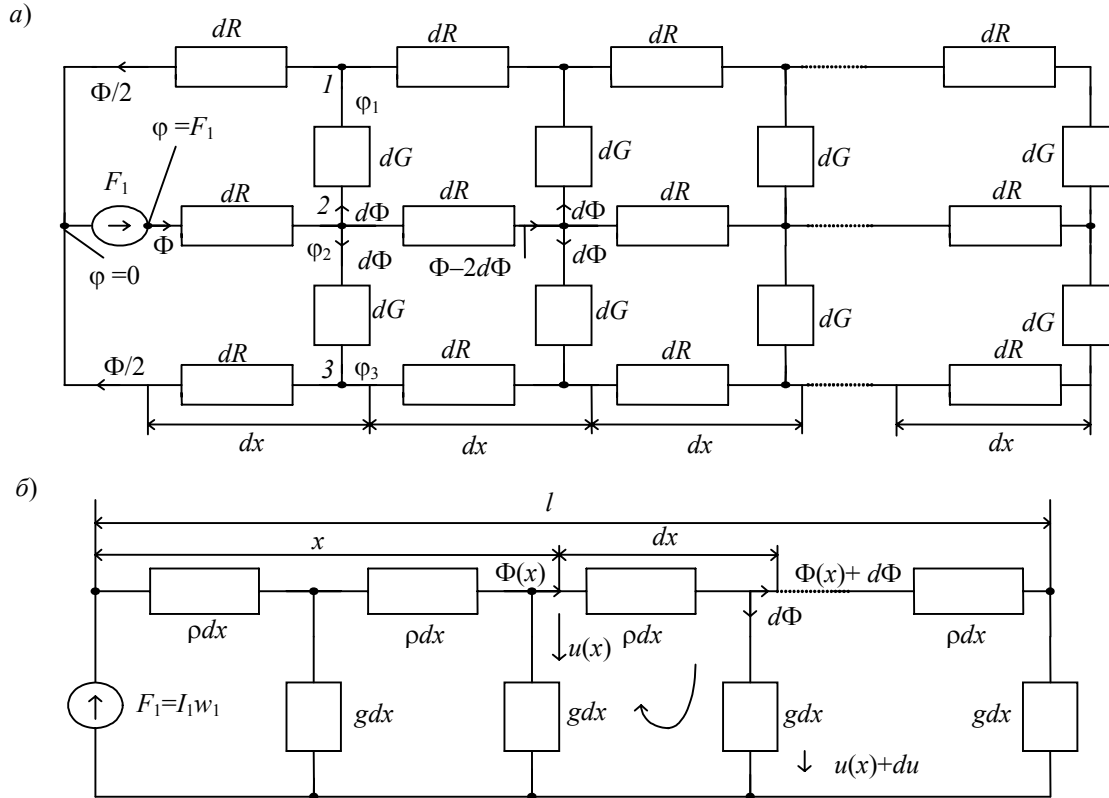


Рис. 3

Магнитную проводимость воздушного зазора между двумя параллельными стержнями длиной l и диаметром d , расположенными на расстоянии l' друг от друга, определим как [4]

$$G = \mu_0 \frac{\pi l}{\ln \left[l'/d + \sqrt{\{(l'/d)^2 - 1\}} \right]}; \quad g = \mu_0 \frac{2\pi}{\ln \left[l'/d + \sqrt{\{(l'/d)^2 - 1\}} \right]}; \quad G^{\text{пп}} = 2G.$$

Из схемы на рис. 3, б следует, что для замкнутого контура, пренебрегая слагаемыми второго порядка малости, по законам Кирхгофа можно получить следующие уравнения:

$$-\frac{du}{dx} = \rho \Phi(x); \quad (4)$$

$$-\frac{d\Phi}{dx} = g u(x), \quad (5)$$

где $u(x)$ — магнитное напряжение между линиями эквивалентной двухпроводной схемы.

При решении уравнений (4) и (5) необходимо задать граничные условия: они известны только для u и имеют вид $u = F_1$ при $x = 0$; $u = 0$ при $x = l$. Из этих же выражений вытекает дифференциальное уравнение

$$\frac{d^2u}{dx^2} - a^2u = 0; \quad a = \sqrt{g\rho} = \frac{\sqrt{G^{\text{ип}} R^{\text{ип}}}}{l},$$

решением которого является следующее выражение:

$$u^{\text{л}} = F_1 [\text{ch}(ax) - \text{cth}(al) \cdot \text{sh}(ax)]. \quad (6)$$

Подставив уравнение (6) в формулу (4), получим выражение для магнитного потока, создаваемого левой катушкой намагничивания:

$$\Phi^{\text{л}}(x) = F_1 \sqrt{g/\rho} \cdot [\text{cth}(al) \cdot \text{ch}(ax) - \text{sh}(ax)].$$

Проделав аналогичные операции для системы, приведенной на рис. 2, б, получим выражение для магнитного потока, создаваемого правой катушкой:

$$\Phi^{\text{п}}(x) = F_1 \sqrt{\frac{g}{\rho}} \cdot \frac{1}{\text{sh}(al)} \text{ch}(ax).$$

Потоки $\Phi^{\text{л}}(x)$ и $\Phi^{\text{п}}(x)$ направлены встречно, поэтому суммарный магнитный поток

$$\Phi(x) = \Phi^{\text{п}}(x) - \Phi^{\text{л}}(x) = F_1 \sqrt{\frac{g}{\rho}} \cdot \left[\frac{1}{\text{sh}(al)} \text{ch}(ax) + \text{sh}(ax) - \text{ch}(ax) \cdot \text{cth}(al) \right].$$

Введем переменную $\xi = x - l/2$, которая позволяет упростить выражение для магнитного потока. Получаем

$$\Phi(\xi) = F_1 \sqrt{\frac{g}{\rho}} \cdot \frac{1}{\text{ch}(al/2)} \text{sh}(a\xi).$$

По формуле (3) находим

$$\Psi_{21}(z) = \frac{w_2}{l_2} \int_{z-l_2/2}^{z+l_2/2} \Phi(\xi) d\xi = \frac{w_2}{l_2} F_1 \sqrt{\frac{g}{\rho}} \cdot \frac{1}{a} \frac{2\text{sh}(al_2/2)}{\text{ch}(al/2)} \text{sh}(az).$$

Данное выражение преобразуется к виду

$$\Psi_{21}(z) = \frac{F_1 w_2 g}{\text{ch}(al/2)} \left(z + \frac{1}{6} a^2 z^3 \right).$$

Теперь можно определить коэффициент взаимной индуктивности контуров

$$L_{12}(z) = \frac{\Psi_{21}(z)}{I_1} = \frac{w_1 w_2 g}{\text{ch}(al/2)} \left(z + \frac{1}{6} a^2 z^3 \right). \quad (7)$$

Выражение для тягового усилия электродинамического вибровозбудителя получается путем подстановки формулы (7) в уравнение (1):

$$P_{\text{эм}} = \frac{\partial L_{12}}{\partial z} I_1 i_2(t) = \frac{F_1 F_2(t) g}{\text{ch}(al/2)} \left(1 + \frac{1}{2} a^2 z^2 \right). \quad (8)$$

Из выражения (8) следует, что сила тяги будет гармонической при $F_2(t) = w_2 I_2 \sin \omega t$, если $a = \sqrt{g\rho} = 0$. Так как при $g = 0$ имеем $P_{\text{эм}} = 0$, то необходимое условие принимает вид $\rho = 0$. Но так как даже при малых значениях индукции $\rho \neq 0$, то в выражении для силы тяги неизбежно наличие отклонения от гармонической зависимости. Это отклонение можно уменьшить за счет недопущения насыщения стали.

Выражение (8) для тягового усилия получено для случая встречного включения левых и правых катушек намагничивания. Используя те же рассуждения, для случая однонаправленного включения катушек, получаем

$$P_{\text{эм}} = \frac{\partial L_{12}}{\partial z} I_1 i_2(t) = \frac{F_1 F_2(t) g}{\text{ch}(al/2)} \left[1 + \frac{1}{2} a^2 z^2 + \text{ath} \left(\frac{al}{2} z \right) \right]. \quad (9)$$

Сравнительный анализ выражений (8) и (9) показывает, что схема однонаправленного включения имеет два существенных недостатка:

— величина $P_{\text{эм}}$ существенно зависит от z , увеличиваясь при $z > 0$ и уменьшаясь при $z < 0$ за счет сомножителя $\text{ath} \left(\frac{al}{2} z \right)$;

— в выражении для магнитного потока имеется значительная постоянная составляющая $2F_1 \sqrt{\frac{g}{\rho}} \cdot \frac{1}{\text{sh}(al)} \cong \frac{2F_1}{R^{\text{пр}}}$, которая приводит к насыщению стали магнитопровода.

Рассмотрим результаты экспериментов. Экспериментальные исследования производились на макете вибровозбудителя, созданном в Псковском государственном политехническом институте.

Макет имеет следующие параметры: амплитуда колебаний на частоте до 1 Гц равна 0,125 м; длина продольных стержней 0,66 м, поперечных стержней 0,42 м, диаметр стержней 10 см, воздушный зазор между продольными стержнями 6 см; постоянное магнитное поле в воздушных зазорах создается с помощью четырех катушек намагничивания, радиус катушки 10 см; подвижная катушка имеет радиус 7,4 см, зазор между катушкой и центральным стержнем магнитопровода, вдоль которого она движется, равен 8 мм; подвижная катушка имеет электромагнитный подвес, состоящий из четырех активных магнитных подшипников, движущихся вдоль двух параллельных направляющих диаметром 25 мм.

Измерение силы тяги производилось посредством измерения силы отрыва. На центральном стержне магнитопровода устанавливался упор. При взаимодействии токов подвижной и неподвижной катушек возникает сила, прижимающая подвижную катушку к упору. К подвижной катушке крепилась нить, перекинутая через блок, к другому концу нити подвешивался груз. Если постепенно уменьшать ток от некоторого максимального значения (1,4 А) до значения, при котором произойдет отрыв катушки от упора, то можно считать, что $P_{\text{эм}} = mg$, где m — масса груза. На неподвижные катушки подавался ток 4 А, на подвижную — 0,16...1,4 А.

Таким образом, была построена зависимость $P_{\text{эм}}(I_2)$ при фиксированных значениях координаты z и тока I_1 ($z = 125$ мм, $I_1 = 4$ А), график которой приведен на рис. 4, а. Анализ рисунка показывает, что расчетное значение силы тяги на 8—12 % выше экспериментального. Причиной расхождения могут быть не учтенные в расчетах такие факторы, как магнитные сопротивления стыков продольных и поперечных стержней магнитопровода; неоднородность магнитных свойств материала по длине стержней; потоки рассеяния катушек намагничивания.

Аналогичным образом была сформирована зависимость $P_{\text{эм}}(z)$ при фиксированных значениях $I_1 = 4$ А и $I_2 = 0,4$ А (см. рис. 4, б). Из рисунка видно, что экспериментальная зависимость силы тяги от координаты имеет параболический вид, что качественно подтверждает теорию. Теоретическая кривая соответствует второму слагаемому в выражении (8) для силы тяги.

Также в ходе эксперимента на основе измерения магнитного потока при токах $I_1 = 5$ А и $I_2 = 1,5$ А было получено значение приведенной поперечной магнитной проводимости еди-

ницы длины магнитной цепи: $g = 7,78 \cdot 10^{-6}$ Гн/м, что практически совпадает с расчетным значением $g = 8,2 \cdot 10^{-6}$ Гн/м при тех же параметрах.

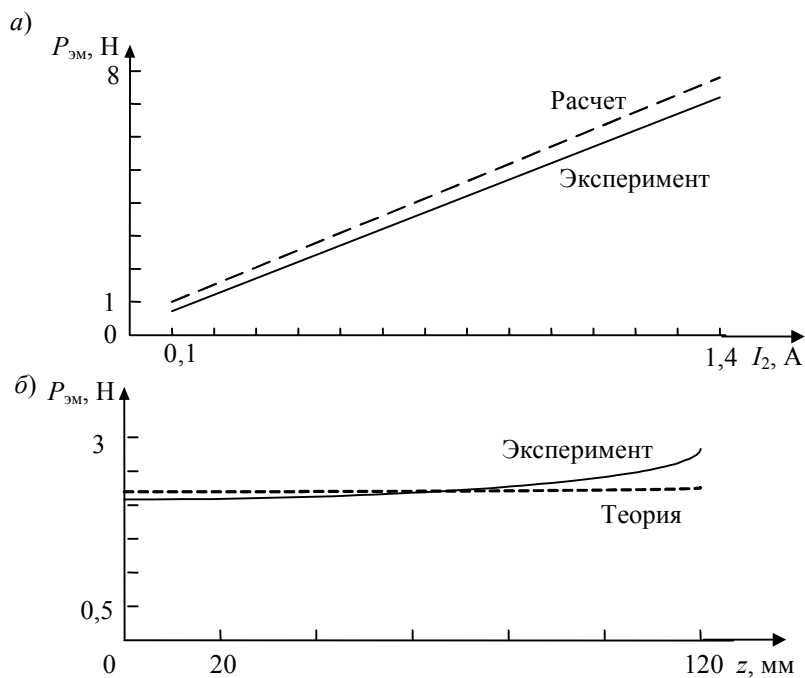


Рис. 4

Результаты эксперимента подтверждают качественно и с допустимой погрешностью количественно справедливость полученного теоретически выражения (8) для тягового усилия.

Результаты, изложенные в данной статье, были положены в основу создания низкочастотного электродинамического вибровозбудителя с магнитным подвесом подвижной части ВМГ-2* [4]; его основные параметры: диапазон частот 0,1—5,0 Гц; максимальная амплитуда колебаний 500 мм; коэффициент нелинейных искажений 0,6 %; несущая способность магнитного подвеса 60 Н; коэффициент трения в подвесе менее 0,0002.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Генкин М. Л., Русаков А. И., Яблонский В. В. Электродинамические вибраторы. М.: Машиностроение, 1975.
2. Грибов А. Н., Журавлев Ю. Н., Мацевич В. Г. Вибровозбудитель низкочастотной вибрации с активной магнитной подвеской подвижной части // Современные проблемы совершенствования средств измерений механических величин: Сб. Л.: Энергоатомиздат, 1986. С. 77—82.
3. Журавлев Ю. Н. Активные магнитные подшипники: Теория, расчет, применение. СПб: Политехника, 2003. 206 с.
4. Постоянные магниты: Справочник / Под ред. Ю. М. Пятиня. М.: Энергия, 1980. С. 488.
5. Zhuravlyov Y. N., Matceyich S. G., Kochevin F. G. et al. Low-frequency electrodynamic vibrator with magnetically suspended movable part // Proc. of the 4th Intern. Conf. on Motion and Vibration Control. 1998. Vol. 3. P. 1063—1067.

Сведения об авторах

- Юрий Николаевич Журавлев** — д-р техн. наук, профессор; Псковский государственный политехнический институт, кафедра строительной механики
- Дмитрий Сергеевич Федоров** — Псковский государственный политехнический институт, кафедра электропривода и систем автоматизации; ассистент; E-mail kreator353@pochta.ru

Рекомендована кафедрой электропривода и систем автоматизации

Поступила в редакцию 26.03.10 г.

* При совместном участии ФГУП „ВНИИМ им. Д. И Менделеева“ (Санкт-Петербург) и Псковского государственного политехнического института [5].